

Contribution de la didactique et de l'épistémologie aux recherches en EIAO

N. Balacheff
CNRS - France ¹

1. APPRENTISSAGE ET ENSEIGNEMENT, UNE APPROCHE DIDACTIQUE

1.1. APPRENTISSAGE ET ENSEIGNEMENT

Le terme *apprentissage* désigne communément un processus adaptatif par lequel un individu élabore les moyens d'une réponse adéquate à certaines situations dans un environnement donné. L'apprentissage concerne l'être humain dès les premiers instants de sa vie, son objet peut être très divers : reconnaissance de sa mère par le nourrisson, apprentissages langagiers permettant la communication, apprentissages kynestésiques du jeune enfant qui devient autonome, apprentissage d'un poème, de la musique, de l'histoire, des mathématiques ... Nous nous limitons ici à l'apprentissage de compétences et de connaissances intellectuelles.

S'il semble exister un consensus sur ce qu'est l'apprentissage, en revanche il est le sujet de théories ou de modélisations très diverses et discutées : associationisme, béhaviorisme, gestaltisme, constructivisme, etc. Nous n'entrerons pas dans cette discussion ici, nous soulignerons seulement que le choix d'un "modèle" ou d'une "théorie" est essentiel pour la conception d'un environnement d'apprentissage.

L'objet de *l'enseignement* est de permettre un apprentissage en optimisant les conditions de sa réalisation, en particulier en l'accélérant. L'enseignement est en fait, dans la plupart des pays, organisé pour répondre de façon efficiente à un besoin social de compétences techniques ou conceptuelles. En effet, l'environnement physique et social de l'être humain est peu susceptible de lui permettre, dans une durée acceptable, la

¹ Laboratoire IRPEACS, BP 167, 69131 ECULLY Cédex FRANCE. (e-mail : balacheff@imag.fr)
Le contenu de ce texte bénéficie largement des échanges et de la collaboration avec le laboratoire LSD2 de l'IMAG à Grenoble, dans le cadre du projet CABRI-géomètre.

redécouverte et la validation de la plus part des connaissances utiles à la société. Que l'on pense par exemple à la caractérisation des séries numériques convergentes, ou aux lois de l'attraction universelle. Cependant l'enseignement n'est pas organisé, en particulier au niveau dit de "l'enseignement obligatoire", avec la seule finalité utilitaire. Il a aussi une finalité culturelle et sociale, comme l'un des moyens de reproduction de la société. Ce ne sont pas ces aspects que nous considérons ici, nous nous en tenons à ce que l'on appelle habituellement "l'acquisition de savoirs et de savoir-faire".

Les systèmes ont une structure et une organisation complexes, nous n'en retiendrons que l'un des constituants fondamentaux : *la classe*. La classe désigne à la fois un lieu géographique et une petite société constituée d'un *maître* et d'*élèves*. Le maître a en charge la responsabilité de l'acquisition par les élèves de connaissances et de compétences particulières sur lesquelles la société s'exprime sous la forme de programmes officiels plus ou moins détaillés et contraignants suivant les pays. Il est ainsi à la fois l'organisateur des apprentissages à l'intérieur de la classe et le "médiateur" entre la classe et son extérieur, la société. Par ailleurs, en particulier dans l'enseignement obligatoire, le maître joue un rôle essentiel pour susciter et maintenir les motivations d'apprentissage de ses élèves, il doit pour cela créer ou invoquer des situations qui justifient son action d'enseignant.

Ces caractéristiques, sur lesquelles nous reviendrons, donnent à l'enseignement une spécificité que l'on ne retrouve pas dans les situations de formation d'adultes. Notamment lorsque ces dernières ont pour objet un transfert d'expertise lié à des pratiques professionnelles, d'abord parce que la démarche des adultes est le plus souvent volontaire et déterminée dans ses objectifs, ensuite parce que le formateur et le formé n'entretiennent en général pas une relation sociale aussi dissymétrique que cela peut être le cas pour l'enseignant et l'enseigné. Cependant, l'enseignement et la formation ont en commun l'objectif de permettre un apprentissage précis dans des situations organisées explicitement à cette fin. C'est autour de cette caractéristique commune que nous développerons notre propos.

Nous nous intéressons plus précisément aux environnements informatiques d'apprentissage, utilisant en particulier les outils de l'intelligence artificielle, comme moyens d'enseignement ou de formation. Nous nous proposons dans la suite d'examiner les problèmes liés à leur conception, réalisation ou utilisation du point de vue du didacticien. Mais il convient d'abord de préciser un peu ce point de vue.

1.2. PROBLEMATIQUE DU DIDACTICIEN

Imaginons un instant que nous entrons dans une école. Plusieurs classes sont au travail sur des sujets divers : géographie, mathématiques, physique, philosophie, etc. Certains faits paraissent pouvoir être observés dans chacune des classes : la structure sociale (un maître, des élèves), des activités d'évaluation, des indications de travaux à réaliser "à la maison", etc. En revanche certains faits diffèrent d'une classe à une autre, en particulier les énoncés dans chacune des disciplines sont justiciables de modes de validations différents : l'acceptation de la validité d'un énoncé en mathématiques, en physique, en géographie ou en philosophie ne se fait pas sur les mêmes critères. Dans l'interaction entre l'enseignant et les élèves, chacune des disciplines impose ses propres "lois" dont la substance est la signification des connaissances qu'elle recouvre.

Le didacticien s'intéresse aux phénomènes spécifiques de l'acquisition d'une connaissance donnée particulière dans un contexte organisé à cette fin. La question essentielle de sa problématique est celle de la signification des connaissances construites par l'apprenant, élève ou adulte en formation, et des relations de cette signification avec les caractéristiques des contextes dans lesquels elle s'élabore. L'étude de cette question place l'épistémologie au centre de la problématique du didacticien.

Pour ce qui nous concerne, nous prendrons nos exemples, ainsi que nos références théoriques et méthodologiques, dans le corpus des travaux en didactique des mathématiques. Dans ce cadre, pour ce qui concerne l'apprentissage, une hypothèse largement partagée est que "l'élève apprend en s'adaptant à un milieu qui est un facteur de contradictions, de difficultés, de déséquilibres un peu comme le fait la société humaine. [Le] savoir, fruit de l'adaptation de l'élève, se manifeste par des réponses nouvelles qui sont la preuve de l'apprentissage" ([Brousseau 86] p.48-49). Cette hypothèse est d'inspiration constructiviste, elle a pour "corollaire" que l'on ne considère pas l'apprenant comme un individu vide de connaissances, mais au contraire comme un individu riche d'une connaissance dont la sollicitation par l'environnement d'apprentissage conduit à la remise en question et l'évolution. Dans le contexte qui nous intéresse, le milieu organisé par le maître est porteur d'une intention didactique éventuellement repérable par l'élève qui peut s'opposer à la réalisation du projet d'enseignement. Par exemple, si l'élève parvient à "lire" dans la situation les attentes du maître et à répondre en conséquence, sa réponse n'est alors pas "la preuve" de l'apprentissage espéré. L'organisation et la gestion des situations d'apprentissage est donc un problème délicat car elles déterminent la signification que les apprenants se

forgeront de la connaissance en jeu. En mathématiques, le didacticien étudie "les conditions que doivent remplir les situations ou les problèmes proposés aux élèves pour favoriser l'apparition, le fonctionnement et le rejet de ces conceptions successives" ([Brousseau 83] p.172).

Un environnement informatique d'apprentissage réalise une situation didactique, au sens où il est conçu, implémenté et mis en œuvre pour permettre un apprentissage déterminé. En nous limitant aux exemples de projets développés en France pour les mathématiques, c'est par exemple le cas d'APLUSIX pour la manipulation d'expressions algébriques élémentaires, CABRI-géomètre pour la géométrie plane, CAMELIA pour le calcul intégral. Que la mise en œuvre de ces environnements soit dépendante ou indépendante des actions d'un tiers, enseignant ou formateur, elle soulève pour le didacticien les mêmes questions quant à la nature des apprentissages qui ont lieu dans ces contextes particuliers.

2. CONSTRUCTION DE LA CONNAISSANCE DANS UN CONTEXTE DIDACTIQUE

2.1. SITUATION DIDACTIQUE ET A-DIDACTIQUE

La différence essentielle entre les situations "naturelles" d'apprentissage et les situations d'enseignement ou de formation, réside dans la finalisation explicite de ces dernières. Non que l'objectif en terme de connaissances à acquérir soit nécessairement énoncé, mais le seul fait de se trouver dans de telles situations signifie qu'un apprentissage doit avoir lieu. L'apprenant comme le maître ou le formateur le savent. Ainsi en mathématiques "l'élève sait bien que le problème a été choisi pour lui faire acquérir une connaissance nouvelle mais doit savoir aussi que cette connaissance est entièrement justifiée par la logique interne de la situation et qu'il peut la construire sans faire appel à des raisons didactiques. Non seulement il le peut, mais il le doit aussi car il n'aura véritablement acquis cette connaissance que lorsqu'il sera capable de la mettre en œuvre lui-même dans des situations qu'il rencontrera en dehors de tout contexte d'enseignement et en l'absence de toute indication intentionnelle. Une telle situation est appelée *situation a-didactique*. Chaque connaissance peut se caractériser par une (ou des) situation a-didactique qui en préserve le sens et que nous appellerons *situations fondamentales*." ([Brousseau 86] p.49).

Le problème de la caractérisation des situations fondamentales pour une connaissance donnée est un problème didactique ouvert, comme l'est le problème de la mise en œuvre d'une situation a-didactique. Nous appelons *situation didactique* ([Brousseau 86] p.50), une situation dans laquelle, à propos d'un apprentissage précis le maître cherche à négocier avec l'élève, de façon plus ou moins explicite, son engagement dans une interaction avec un environnement organisé pour permettre cet apprentissage. Cet environnement doit avoir une double caractéristique, d'une part sa spécificité relativement à la connaissance à acquérir (situation fondamentale), d'autre part sa capacité à fonctionner indépendamment d'une intervention didactique explicite (situation a-didactique). Cette négociation conduit à ce que nous appelons un *contrat didactique*, en général tacite, qui permet de situer les places respectives du maître et de l'élève et les jeux qu'ils jouent relativement au savoir engagé dans la situation : "A un moment donné de l'enseignement, l'élève se trouve engagé par son contrat didactique dans un rapport plus ou moins réel avec un milieu organisé (au moins en partie) par le système éducatif. Ce rapport a été organisé afin de justifier la production *pertinente* par l'élève de comportements qui sont les indices de l'appropriation du savoir. C'est-à-dire que la réponse de l'élève ne doit pas être motivée par des obligations liées au contrat didactique mais par des nécessités a-didactiques de ses relations avec le milieu." ([Brousseau 86] p.90).

Le "rêve" initial qui a accompagné l'émergence d'outils informatiques pour la formation et l'enseignement, avait pour clé le désir d'un système informatique permettant une interaction indépendante du maître humain et qui donc aurait les caractéristiques d'une situation a-didactique. Complété des vertus d'une représentation analogique des objets de connaissance à l'écran de l'ordinateur et des possibilités de "manipulation directe" de ces objets, l'outil informatique devait certainement permettre un accès plus immédiat à la connaissance. Accès enfin débarrassé du passage obligé par "Le Maître" et ses jugements, par le discours, les représentations graphiques problématiques ou les expériences ad hoc.

La réalité fut moins simple.

2.2. A PROPOS DU "SITUATED LEARNING"

L'"échec" relatif des "Tuteurs Intelligents" à tenir les promesses évoquées par les pionniers a conduit à l'émergence d'une analyse nouvelle des problèmes de l'enseignement et de la formation. En particulier la communauté Nord Américaine

développe un effort de théorisation dont les mots clés sont "situated learning", "reification of knowledge", "apprenticeship", etc. ([Lave 89], [Brown 89]).

Le point essentiel de cette approche est la reconnaissance de la dépendance de la signification des connaissances construites par un apprenant du contexte particulier de son apprentissage. De ce point de vue les apprentissages dans le cadre du système scolaire et hors du système scolaire paraissent avoir des caractéristiques opposées [Resnick 87]. A la suite de Resnick, Brown souligne le contraste entre ces deux environnements d'une façon saisissante (figure 1).

IN	OUT
laws	causal stories
symbols	situation
well defined problems	emergent delemma
fixed meaning	negociated meaning
good grades	sense making

l'opposition "IN/OUT schools"
d'après [Brown 89]

Figure 1

L'opposition est bien radicale, voire manichéenne entre le monde rigide et stérile de "l'école", et celui dynamique et fécond du "monde réel". En fait, ce que Brown met en relief est l'effet possible, et extrême dans la description ci-dessus, d'une intention didactique sur la connaissance. La difficulté est réelle, nous en convenons, mais elle a été identifiée par les recherches en didactique comme un phénomène spécifique de tout système didactique.

Pour sa part, Brown, renoue avec le vieux rêve des technologies de formation en promettant des environnements "high tech." qui, par leur capacité à rendre visible l'invisible, à offrir des objets virtuels à la manipulation directe, et à gérer une intervention didactique discrète (coaching), permettront de reconstituer les conditions d'apprentissage permettant une authentique activité, une interaction sociale féconde (collaborative learning), une construction du sens dans une situation proche de la réalité (apprenticeship) [Brown 89]. Cette réaction aux difficultés rencontrées dans la mise en

œuvre d'environnement d'apprentissage informatique a tous les symptômes d'une fuite en avant².

Quant à nous nous divergeons sur la façon d'analyser cette difficulté et de forger des outils pour la dépasser. Ainsi, notre postulat fondamental, conforté par les travaux autour du concept de contrat didactique, est que tout système didactique génère paradoxalement les causes même de son échec éventuel. "L'école" constitue un lieu complexe pour l'apprentissage, mais cette complexité ne peut être supprimée par le seul fait de disposer de moyens techniques plus performants. Même les situations de formation, bien que paraissant moins complexes a priori parce que s'adressant à des adultes, n'échappent pas à ce phénomène. L'idée de reconstituer la réalité au sein de la situation d'apprentissage est d'emblée vouée à l'échec si elle doit être mise en œuvre de façon aussi simpliste. En effet, elle n'est pas autre chose que le projet de faire fonctionner une situation a-didactique dans le système didactique. A notre sens la réussite de ce projet est liée d'abord à la possibilité de négocier un contrat didactique acceptable au regard des exigences des partenaires et de la connaissance concernée.

Très justement, la problématique du "situated learning" met en avant le rôle joué par le milieu, social et matériel, dans la construction de la connaissance. Dans le cadre théorique qui lui est associé l'école est considérée comme une "communauté de pratique" particulière élaborant des significations spécifiques de ses pratiques et de son contexte ([Lave 89] p.25). Une particularité soulignée de "l'école" est la place qu'elle donne à l'évaluation dans l'interaction entre le maître et les élèves, place centrale qui conduit à substituer à la *valeur d'usage* de la connaissance, une *valeur d'échange* dans la négociation de la réussite entre le maître et ses élèves ([Lave 89] p.33). Ce point de vue peut être généralisé : tout processus didactique repose sur une interaction sociale dissymétrique entre un maître, ou formateur, et un ou plusieurs apprenants, dont l'enjeu est une connaissance. Cette connaissance ne prendra sa signification "vraie" que si elle atteste de sa valeur d'usage relativement à un contexte de fonctionnement organisé pour cela, mais le contexte social de ce fonctionnement est porteur de la possibilité de la constitution de cette connaissance comme valeur d'échange au sein de la communauté de pratique, classe ou groupe de formation.

La problématique du didacticien est de déterminer les conditions que doivent remplir les situations d'apprentissage pour permettre l'émergence de cette valeur d'usage

² Notons que l'orientation des recherches de Resnick est actuellement bien différente, il s'agit actuellement de l'introduction dans la classe de situations d'interaction sociale qui permette de restaurer un véritable débat sur la connaissance. Cette approche achoppe sur le rôle du maître (cf. par exemple : [Resnick 90]), nous pensons que cela tient en particulier au fait que ce rôle n'a pas été repéré au sein du processus didactique autrement que par les dysfonctionnements observés de l'enseignement dit "traditionnel".

de la connaissance, et limiter les effets de l'interaction didactique qui pourraient s'y opposer.

3. UNE PROBLEMATIQUE EPISTEMOLOGIQUE DE L'EIAO

3.1. POINT DE VUE SUR L'EPISTEMOLOGIE

Par épistémologie nous désignons ici l'étude des rapports qu'entretient un individu ou une communauté avec un objet de connaissance. Ce peut être notamment l'étude de ces rapports à un moment donné de l'histoire d'une science ou dans le cours de son évolution, c'est l'objet de l'épistémologie historique, ou leur étude dans le cours du développement d'un individu, c'est par exemple l'épistémologie génétique de Piaget.

Un thème essentiel de l'épistémologie est celui de l'élucidation de la question du sens, de son origine et de son évolution dans le cours de l'histoire, individuelle ou collective, d'une connaissance. La complexité de cette question tient d'abord à ce que le sens n'est pas directement observable, et qu'il ne peut être tout entier contenu dans la formulation d'une définition. Le concept de nombre, par exemple, ne se laisse pas enfermer dans une déclaration, sa signification ne peut être saisie qu'au travers de ses manifestations symboliques et de son rôle dans la résolution de problèmes. Ainsi, l'écriture décimale est-elle le produit d'un long processus historique, les nombres négatifs étaient-ils contestés comme tels au XIX^e siècle et, enfin, le débat récent sur les entiers non standards a-t-il bien attesté de la complexité de ce concept "élémentaire" et de son caractère vivant. Le nombre n'est nulle part "visible", c'est un "construit" légitimé par la force de ses applications et validé par les moyens propres à la science qui l'a élaboré. De la même façon l'histoire cognitive de l'individu atteste de la complexité de cette question du sens.

Faute de pouvoir accéder directement au sens ou de pouvoir l'exprimer dans une définition, nous le décrivons par ses effets attestés par l'activité cognitive qui, elle, est susceptible de produire des observables. Suivant Vergnaud, nous caractérisons le sens d'un concept par trois ensembles étroitement liés : un ensemble de problèmes pour lequel il fournit un moyen fiable et efficace de résolution, un ensemble de procédures (invariants opératoires) outils pour la résolution de ces problèmes, un ensemble de signifiants support d'un langage opératoire pour la description des problèmes et des procédures [Vergnaud 84]. Par exemple, le nombre entier naturel selon qu'il est représenté par une

collection d'objets ou par une écriture décimale, ne permet pas d'accéder aux mêmes classes de problèmes ni de mettre en oeuvre les mêmes procédures. Le sens du concept de nombre n'est pas le même dans les deux cas ; le passage d'un sens à l'autre correspond à l'évolution conceptuelle de la quantité au nombre stricto sensu.

L'analyse épistémologique, qu'elle prenne pour matériau l'histoire collective ou l'histoire individuelle, met en évidence la multiplicité des facteurs en jeu dans la détermination du sens : facteurs d'ordre matériel, social, culturel, ou idéologique. Elle montre le rôle essentiel joué par le contexte social et matériel de l'élaboration d'une connaissance nouvelle, tout particulièrement, dans l'apprentissage, sa sensibilité aux caractéristiques des situations d'enseignement ou de formation. Elle montre surtout que la connaissance impose ses propres lois pour accéder à son essence ; comme nous l'avons évoqué, les critères du "vrai" en mathématiques, physique et philosophie ne sont pas réductibles les uns aux autres.

C'est pour cela que les recherches qui prennent pour objet l'EIAO ne peuvent échapper au questionnement de l'épistémologie. Les environnements d'apprentissage développés, les technologies sous-jacentes aux techniques mises en œuvre, les savoirs développés au service de ces technologies, doivent être explorés du point de vue de la nature des connaissances qu'ils permettent de construire avec la même exigence que celle qui préside à leur validation au sein de la communauté scientifique dont ils sont les produits.

3.2. EPISTEMOLOGIE ET IA UN POINT DE VUE REVISITE

Pour l'intelligence artificielle, la dimension épistémologique est l'étude des "faits du monde" qui sont à portée d'un observateur dans des circonstances données de l'observation, comment ces faits peuvent être représentés dans la mémoire de l'ordinateur, et quelles règles permettent de valider les conséquences tirées de ces faits" [McCarthy 77].

La problématique que nous envisageons nous conduit à retourner ce questionnement : un ordinateur proposant une représentation du monde et de son fonctionnement, quelle relation entretient cette représentation avec le monde représenté ? Le plus souvent ce problème est envisagé dans les termes de la *fidélité*. En voici un exemple caractéristique à propos des environnements de simulation : "The concept of how closely the simulated environment matches the real world is referred to as *fidelity*. A high-fidelity simulation is one that is nearly indistinguishable from the real thing. Researchers have identified several different kinds of fidelity that serves in different

situations. There are at least four kinds : *physical fidelity* (feels the same), *display fidelity* (looks the same), *mechanistic fidelity* (behave the same), and *conceptual fidelity* (is thought of as the same)." ([Burton 88] p.119-121). Wenger introduit la notion de *fidélité épistémique* ([Wenger 87] p.313) dont l'idée maîtresse est la réduction de l'écart entre la réalisation physique d'une représentation à l'interface d'un système et l'expertise³, éventuellement identifiée à sa modélisation interne au système (*fidélité épistémique relative*).

Ces approches nous paraissent ignorer la relation complexe qui peut exister entre signifiant, signifié et un éventuel référent. Une "représentation du monde" n'est pas le "monde" lui-même, il n'en est même pas une approximation au sens d'une simplification de la réalité pour permettre sa "re-présentation". Cette représentation aura des propriétés héritées à la fois des choix de modélisation qui auront été faits et des caractéristiques des moyens de sémiotiques retenus, ces propriétés sont a priori étrangères au "monde" représenté. Par ailleurs, en temps que dispositif matériel, l'ordinateur impose un ensemble de contraintes qui elles-mêmes vont exiger une transformation du "monde" pour permettre l'implémentation de sa représentation.

Nous parlerons de *transposition informatique* pour parler de ce traitement de la connaissance qui en permet la représentation et l'implémentation dans un dispositif informatique, qu'il s'agisse ensuite de la "montrer" ou de la "manipuler". Dans le contexte de l'EIAO cette transposition prend une importance particulière, elle signifie en effet une contextualisation de la connaissance qui peut avoir des conséquences importantes sur la nature des apprentissages.

C'est le problème que nous allons maintenant envisager.

3.3. TRANSPOSITION DIDACTIQUE ET TRANSPOSITION INFORMATIQUE

"Un contenu de savoir ayant été désigné comme savoir à enseigner subit dès lors un ensemble de transformations adaptatives qui vont le rendre apte à prendre place parmi les *objets d'enseignement*. Le «travail» qui d'un objet de savoir à enseigner fait un objet d'enseignement est appelé la *transposition didactique* " ([Chevallard 85] p.39). Cette transposition n'est pas réductible à une simplification qui diminuerait la complexité d'une connaissance mais en préserverait le sens. A la fois par les liens qu'elle détermine avec

³ Par l'adjectif "épistémique" Wenger fait référence à une connaissance en dehors de son rapport à un sujet connaissant. En quelque sorte une référence absolue, il pourra ainsi parler de "l'expertise" en soi, distinguée des modèles mentaux de l'expert auxquels il réfère par l'attribut "conceptuel". Il remarque : "Whether such an epistemic level really exists in some platonic sense is not the point here. The claim is, rather, that the distinction between the epistemic and the representational levels is useful in designing and evaluating models of communicable knowledge" ([Wenger 87] P.312).

les connaissances anciennes et par la mise en scène qu'elle requiert pour en rendre possible l'enseignement, elle atteint la connaissance dans sa signification même. Prenons l'exemple, classique, de l'introduction des nombres décimaux à partir de la mesure et des changements d'unité. Dans cette approche, à l'école élémentaire et au collège, il s'impose de fait que la mesure d'une longueur peut toujours s'exprimer par un nombre entier si on choisit une unité assez petite, mais le nombre décimal introduit dans ce contexte pourra apparaître légitimement comme une complexification du nombre entier, non comme un nouveau nombre [Brousseau 83].

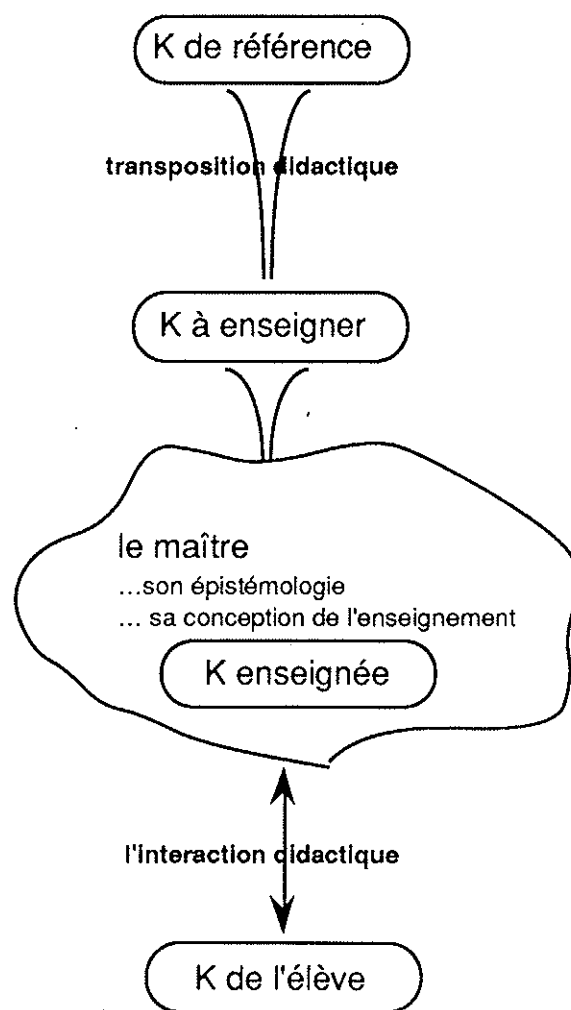


Schéma de transformation d'une connaissance K donnée, dans un contexte ne recourant pas à des moyens EIAO.

Figure 2

Le schéma ci-dessus (figure 2) résume les différents niveaux de travail sur la connaissance dans le processus complexe qui permet d'abord de l'identifier et de la

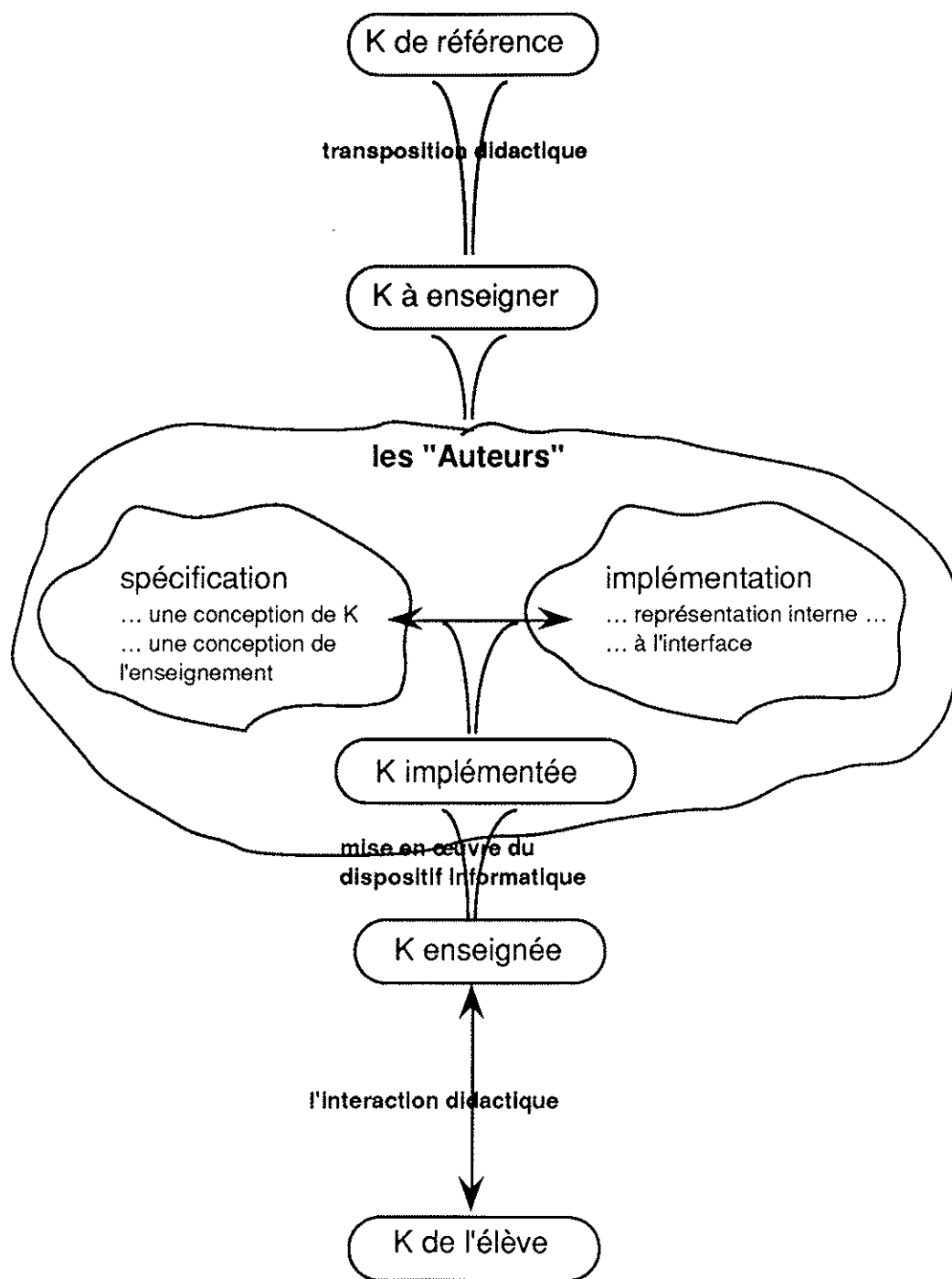


Schéma de transformation d'une connaissance K donnée, dans un contexte d'autoformation recourant à des moyens EIAO. Ce schéma explicite les termes principaux de la transposition informatique.

Figure 3

spécifier comme connaissance à enseigner, puis l'engagement dans le processus didactique qui en permet l'enseignement. Ce dernier mobilise les conceptions du maître qui les met en œuvre sur la connaissance à enseigner, sur l'enseignement et l'apprentissage. Enfin, les connaissances antérieures de l'élève vont elles-mêmes jouer un rôle dans la construction des connaissances nouvelles qui résulteront de l'interaction didactique.

L'utilisation de moyens informatiques tels l'EIAO complexifie le schéma précédent en ajoutant tout le processus de conception et de réalisation du logiciel lui-même (figure 3). En effet, une fois la connaissance à enseigner repérée, il reste à spécifier l'architecture de l'environnement d'apprentissage, ce qui engage les conceptions des "auteurs" sur la connaissance et les moyens de son enseignement, puis à réaliser l'implémentation qui ajoutera ses propres contraintes liées aux caractéristiques du dispositif informatique. C'est ce dernier processus qui conduit à la production effective de l'environnement informatique d'apprentissage que nous appelons *transposition informatique* (figure 4). Les schémas que nous envisageons ici ne considèrent que le cas de l'interaction de l'apprenant avec un dispositif informatique en dehors de l'interaction avec un tiers éventuel (cas de l'autoformation). Nous discuterons, à propos de l'interaction didactique la situation où l'EIAO est utilisée comme moyen d'enseignement par un maître ou un formateur.

Une des pierres d'achoppement du développement d'un environnement d'apprentissage informatisé est la spécification des modèles de connaissances, leur formalisation et, finalement, leur représentation symbolique. Ce codage dans un système de signifiants qui est a priori étranger à la connaissance sur laquelle il opère, a nécessairement des effets producteurs et des effets réducteurs. Le problème des effets réducteurs a été identifié, un paradigme de recherche particulièrement développé dans ce domaine est celui de l'explication dans les systèmes experts à des fins de formation [Vivet 87] ou de justification [Kassel 89]. Les limites de la représentation explicite de connaissances sous la forme de règles de production ont été bien mises en évidence : l'énoncé d'une règle ne suffit pas à rendre compte de sa signification ou de ses raisons. Les effets producteurs, en revanche, ne semblent pas avoir fait l'objet d'une problématisation particulière. On a pourtant pu mettre en évidence, dans des contextes "classiques" d'enseignement, que les représentations graphiques ou iconiques, que l'on retrouve comme moyen de communication à l'interface de nombreux systèmes, sont susceptibles d'induire des conceptions erronées très robustes [Arnaud 84]. Nous voyons là la vitalité d'une "illusion de la transparence" mise en évidence en mathématiques à

propos du rapport entre la représentation graphique d'une fonction, tracée sur un support matériel, et son graphe, objet mathématique [Rogalski 84].

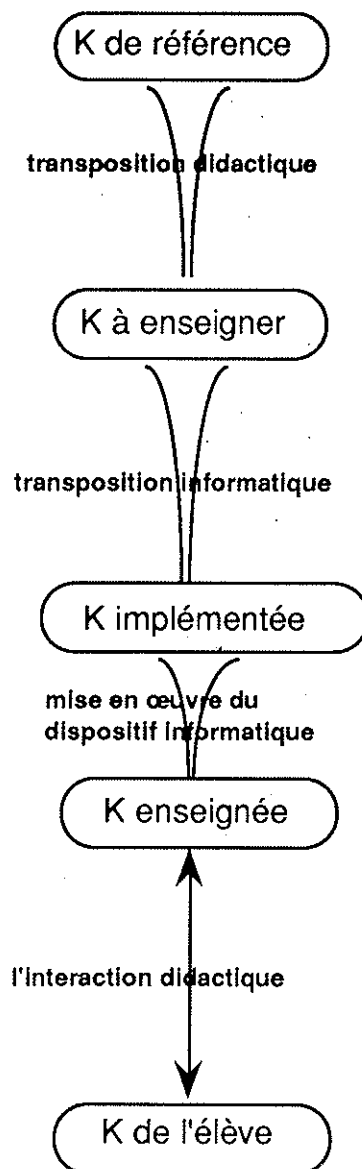


Schéma de transformation d'une connaissance K donnée, dans un contexte d'autoformation recourant à des moyens EIAO. Ce schéma explicite la place de la transposition informatique.

Figure 4

Comme nous l'avons souligné plus haut, le problème de la relation du représenté à la représentation est le plus posé en terme de *fidélité*. Peut être cela est-il hérité de la problématique de développement d'environnements d'apprentissage comportementaux :

"A highly realistic depiction of the device or environment and equally realistic techniques for interacting with this interface may be necessary for the student to understand and learn the domain. This belief has led to the development of flight simulators and maintenance training systems that are based on real-world devices, and that give students direct experience with both the devices and the domain problem on which they are used" ([Miller 88] p.175). Les recherches dans cette direction ont conduit à développer des interfaces matérialisant des concepts sans référents matériels directs, tels la vitesse, la force, l'énergie, pour en permettre la "manipulation directe". Rechercher ainsi un mode d'accès direct aux concepts eux-mêmes revient à passer outre le problème fondamental de la relation entre signifiant et référent, rendu plus complexe ici par l'absence fréquente de référent matériel, et de la relation entre signifiant et signifié. A notre sens, la recherche de modes d'accès à la connaissance libres de tout biais étant vaine, il serait plus fécond, un mode de modélisation et de représentation étant adopté, de poser le problème de la caractérisation de la relation qu'il détermine avec la connaissance concernée.

Le problème des effets réducteurs et producteurs est un aspect d'une problématique plus générale : les choix de modélisation et de représentation des connaissances peuvent affecter la connaissance dans sa nature même dans un processus de transposition informatique aux effets analogues à ceux de la transposition didactique. Ils sont par là susceptibles d'affecter de façon essentielle l'apprentissage, c'est-à-dire la reconstruction du sens par l'apprenant qui opère dans le contexte que ces choix déterminent. En fait, le travail de transposition informatique sur la connaissance, et le problème de ses conséquences éventuelles, a déjà été identifié à propos de la spécification et du développement de systèmes experts pour la formation. Pour le développement de APLUSIX, Nicaud remarque que si de nombreux travaux existent en Intelligence Artificielle concernant les manipulations algébriques, en fait "les logiciels qui ont été réalisés utilisent très souvent des méthodes éloignées du raisonnement humain, ce qui les rend inaptes à être utilisés pour l'enseignement des manipulations algébriques. Ainsi [de] puissants systèmes contiennent des connaissances mises en oeuvre de façon procédurales ; ils ne peuvent pas être l'expert d'un tuteur intelligent sur les manipulations algébriques [...] APLUSIX est un système expert qui a été conçu pour simuler le mieux possible le raisonnement humain pour une classe d'exercices d'algèbre" ([Nicaud 89a] pp.146-147). Le travail, entrepris par Nicaud, pour la modélisation de la manipulation des expressions algébriques élémentaires est déterminé par la fonction didactique du système, il est en cela de l'ordre de la transposition didactique sous les contraintes technologiques du système informatique.

Mais la problématique développée dans ce domaine pour les systèmes experts est restée jusqu'ici essentiellement technicienne en s'efforçant de trouver la meilleure transposition, alors que le phénomène en question est inhérent au projet d'inscription de la connaissance dans un dispositif matériel, et donc dans un cadre et avec des moyens qui lui sont a priori étrangers ; c'est-à-dire dont l'élaboration n'est pas constitutive de la connaissance elle-même.

Prenons l'exemple du concept de cercle dans les environnements LOGO et CABRI-géomètre. Ces deux micro-mondes permettent de représenter et de manipuler des objets de la géométrie élémentaire plane, mais le concept de cercle est fondamentalement différent dans les deux cas. Pour LOGO le cercle est le résultat d'une procédure de tracé qui en fait un polygone régulier à "beaucoup de côtés". C'est le contrôle perceptif à l'écran qui conduit à considérer l'objet tracé non plus comme un polygone régulier mais comme un cercle. Au mieux le cercle apparaît comme une courbe à courbure constante. Dans CABRI-géomètre un cercle est déterminé par son centre et un point de sa circonférence. Un même problème, celui de la construction de trois cercles tangents deux à deux extérieurement, n'aura pas la même complexité dans les deux environnements.

Bien sûr, on ne manquera pas d'évoquer le recours à des représentations multiples, mais il n'y a pas d'évidence qu'il existe un recouvrement fini qui ne laisserait pas hors de portée un aspect significatif de la connaissance en question.

Une autre voie consisterait à délimiter le *domaine de validité épistémologique* de la modélisation choisie. Ce domaine peut être caractérisé par l'ensemble des problèmes pour lesquels la modélisation adoptée donne les moyens d'une résolution, la nature des solutions possibles et de celles qui sont exclues, la nature des systèmes de signifiants choisis pour la représentation interne et à l'interface, et leurs implications potentielles sur les conceptions résultantes.

4. MODELISATION DE L'APPRENANT

4.1. POINT DE VUE DU DIDACTICIEN

Pour ce qui concerne les connaissances complexes, le choix de l'hypothèse constructiviste s'impose actuellement comme le plus fécond. Suivant cette hypothèse, que nous adoptons, l'apprenant explore son environnement et participe activement à la construction de l'espace, du temps et de la causalité [Inhelder 85]. Cela signifie, pour

reprendre la métaphore bien connue de Popper, que l'apprenant n'est pas un seau vide que l'on remplit mais qu'il est, au contraire, l'artisan d'une authentique re-construction de la connaissance. Cette construction peut être décrite comme le résultat d'un processus d'adaptation de l'organisme cognitif (le sujet épistémique de Piaget) aux contraintes des situations dans lesquelles il opère. La connaissance d'un individu est le résultat d'un processus complexe de dépassement d'un déséquilibre cognitif dans lequel son état cognitif initial et une situation particulière l'avaient placé.

Une classe importante de problèmes dont s'occupe le didacticien est la modélisation des connaissances de l'apprenant ; nous appelons *conception* un tel modèle, relativement à une notion déterminée, pour en marquer le rattachement singulier à la personne. L'acceptation de l'hypothèse constructiviste, et donc d'un modèle d'apprentissage par adaptation, a pour conséquence la nécessité de connaître précisément l'état initial des conceptions attribuées à l'élève et les caractéristiques de la situation dans laquelle l'apprentissage a lieu. Par "situation" nous entendons ici "situation-problème", c'est-à-dire une situation susceptible de créer un déséquilibre (un problème pour l'élève) dont le résultat du dépassement serait la connaissance visée.

En mathématiques, le rôle essentiel joué par les situations problèmes dans la construction d'une connaissance est bien exprimé par une formule : les problèmes sont la source et le critère du savoir [Vergnaud 81]. A condition de donner au terme "problème" une signification un peu élargie, il nous semble que cette formule pourrait être reprise pour d'autres domaines de connaissance. Mais les conceptions⁴ construites par les élèves dans de telles situations, parce qu'elles résultent d'une adaptation, peuvent avoir un caractère local, porter la marque originale du contexte de leur élaboration, et finalement être erronées relativement à une connaissance de référence. En atteste le fait que la modification de certaines caractéristiques de ces situations, qui peut paraître insignifiante mesurée à l'aune de l'expertise, peut provoquer des dysfonctionnements importants de l'élève, révélés par la mise en œuvre de procédures inadaptées, voire par des erreurs.

Par exemple, l'introduction de la symétrie orthogonale par le pliage privilégie une conception de cette transformation plane comme une application d'un demi-plan sur l'autre ; mais une telle conception se révélera inadaptée pour la construction du symétrique d'une figure que couperait l'axe de symétrie. Ce problème n'entretient pas avec ceux qui l'ont précédé dans le cours de l'apprentissage une simple relation de complexification, il requiert des élèves une conception de la symétrie orthogonale essentiellement différente de celle qui suffit pour résoudre des problèmes dans lesquels la

⁴ Par un raccourci qui facilite l'expression nous parlons de "conception de l'élève". Le lecteur voudra bien comprendre là "conception attribuée à l'élève par le didacticien".

figure à transformer tient toute entière dans un des demi-plans déterminé par l'axe de symétrie [Grenier 88].

Plus généralement, nous nous intéressons aux erreurs en tant qu'elles peuvent constituer des symptômes de l'existence d'une conception dont on peut montrer par ailleurs un domaine de validité par le succès à résoudre une certaine classe de problèmes. Dans ce sens, une conception, même fausse, est une véritable connaissance ; c'est cette affirmation qui porte à dire : "l'élève connaît, mais il connaît autrement".

Par exemple, des élèves citeront sans hésiter un nombre entre 2,7 et 2,9 mais nieront l'existence d'un nombre entre 3,25 et 3,26. Cette erreur, très répandue, est révélatrice d'une conception du nombre décimal comme nombre entier à virgule [Brousseau 83]. Cependant, cette même conception permet une maîtrise rapide des quatre opérations et la résolution de la plupart des problèmes de la "vie courante".

Le problème didactique soulevé par de tels phénomènes n'est pas seulement d'obtenir la disparition des erreurs comme faits, mais d'en comprendre les origines et de déterminer les conditions de l'évolution des conceptions sous-jacentes. Ce problème est difficile parce que le dépassement d'une contradiction, ou d'un déséquilibre, ne se fait pas nécessairement dans le sens d'un progrès lorsqu'une connaissance complexe est concernée ([Balacheff 88], [Johsua 87]). En particulier, l'adaptation peut avoir un caractère ad hoc en permettant de faire face de façon minimale à la situation rencontrée. Il est bon d'avoir à l'esprit qu'un tel comportement n'est pas le fait des seuls élèves, mais que les communautés savantes résistent elles aussi à la contradiction, préférant parfois "de nouvelles versions et des remaniements ad hoc de leur théorie afin d'éliminer tout conflit apparent" ([Kuhn 70] p.115).

4.2. MODELISATION COMPORTEMENTALE ET EPISTEMIQUE

Le calcul des interactions d'un système tutoriel intelligent avec l'apprenant s'appuie le plus souvent sur des principes pédagogiques généraux⁵ et une interprétation des comportements de l'apprenant observés à l'interface du dispositif informatique. Les difficultés rencontrées ont très rapidement conduit à poser le problème de la construction d'un modèle des connaissances de l'apprenant comme partie intégrante de l'architecture des systèmes et à formuler des questions épistémologiques liées principalement au diagnostic. Wenger distingue, dans le diagnostic, le niveau comportemental et le niveau épistémique ([Wenger 87] pp.367-394). Cette distinction repose, respectivement, sur l'absence ou la présence d'*interprétation* des comportements. L'absence d'interprétation

⁵ "tutoring", "coaching", "guided discovery learning", etc.

ne signifie pas, au sens de Wenger, que seuls sont pris en compte les observables à l'interface du système, mais que l'inférence de comportements non observés se limite à la reconstruction des actions au sens des opérations nécessaires à la résolution de problèmes sans chercher à en tirer un modèle de l'état des connaissances de l'apprenant (student's knowledge state). En revanche le diagnostic épistémique consiste en une interprétation des comportements, éventuellement reconstruits, de l'apprenant pour élaborer un modèle de ses connaissances. Cette problématique paraît lier le questionnement épistémologique uniquement au projet d'interprétation des comportements dans la mesure où ce serait à ce niveau que serait examinée la question de la nature des conceptions de l'apprenant, en particulier à propos de l'interprétation des erreurs.

La position exprimée par Wenger suppose clarifiée la question de savoir ce qu'est un comportement vu à travers le filtre de l'interface d'un système informatique. Les choses sont moins simples qu'il ne le paraît. Pour le montrer, nous proposons de distinguer d'une part l'univers des observables et de modélisation externe au système, d'autre part l'univers des observables et de modélisation interne au système (figure 5).

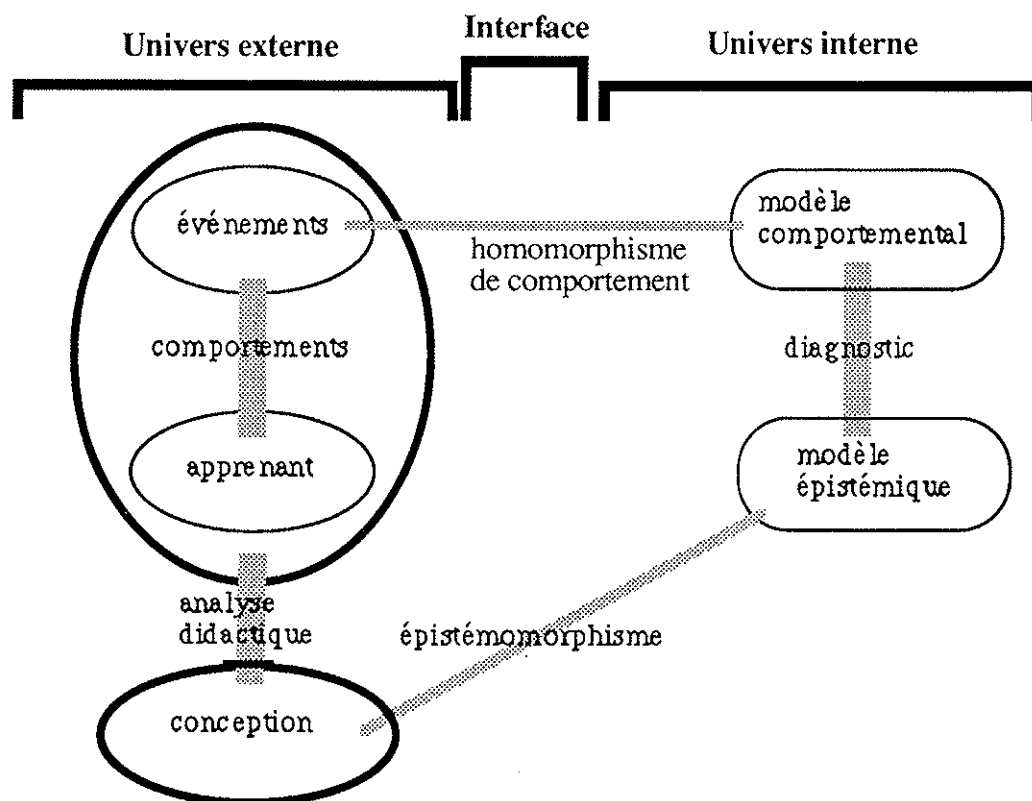


Figure 5

L'univers externe au système offre à l'analyse une réalité qui n'est pas directement organisée en observables. Les observables sont le résultat d'un découpage et d'une organisation du "réel" sous un contrôle théorique et méthodologique dont la pertinence est déterminée par la problématique de l'observateur⁶. Ainsi le travail du didacticien comprend la constitution d'un corpus d'observables, parmi lesquels ceux appelés "comportements" de l'apprenant, à partir duquel est construit un modèle des connaissances de l'apprenant que nous appelons *conception*. Ce modèle est une construction théorique du chercheur et non ce qui est effectivement "dans" la tête de l'apprenant, sa validation expérimentale ne peut qu'en confirmer la valeur opératoire dans une problématique donnée, voire explicative au sein d'un cadre théorique plus général, mais elle ne peut pas le légitimer comme reconstitution de la structure mentale effective. Ce glissement était fréquent au début des recherches en EIAO : "It was Carbonell's belief that the semantic net representation of the knowledge base use in this project [SCHOLAR] was close to the internal knowledge structure of humans. This belief was reinforced by a fair amount of contemporary experimental work" ([Anderson 88] p.40). Ce point de vue a été assez dominant pour susciter aujourd'hui une critique vigoureuse : "we must not confuse learning with repeating an observer's description of how the performance will appear" [Clancey 90]⁷.

L'univers interne offre à l'analyse une réalité constituée de l'ensemble des événements, au sens informatique, saisis à l'interface du système. Cet ensemble est susceptible d'une description au sens de la physique⁸ dont nous pensons acceptable de postuler qu'elle est exhaustive, mais pas plus que la réalité externe cet ensemble ne se constitue directement en observables pertinents qui seraient les arguments du calcul des interactions.

Pour cela nous distinguons deux types de modélisation, et donc de modèles, jusqu'ici non distingués dans l'architecture des systèmes : le *modèle comportemental* et le *modèle épistémique*.

⁶ "La nature s'offre à notre connaissance immédiate avec une richesse et une complexité extraordinaire [...] Au fond, il n'y a pas de «partie» dans la nature, de faits qui soient par eux-mêmes distincts des autres, car la réalité se présente à nous comme une masse confuse, et c'est nous qui, par notre activité mentale, découpons la nature en une multiplicité de faits artificiellement isolés les uns des autres, afin de répondre à nos besoins, à nos tendances, à notre volonté d'action, ou à notre désir de connaissance. En d'autres termes, nous *analysons* la nature [...] Pour observer des faits et les délimiter, il convient d'être sollicité par des idées directrices, telles que théories et principes préalables." ([Gex 47] pp.97-99).

⁷ Il semble que cette erreur "épistémologique" ait été moins fréquente en Europe.

⁸ Pour autant que le problème de la distinction du bruit et du signal puisse être considéré comme résolu dans ce cas.

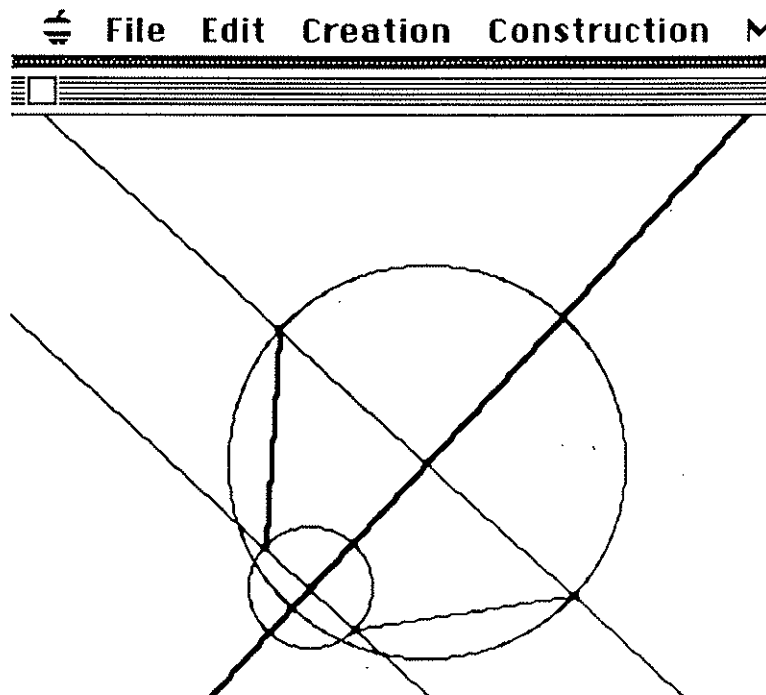
4.2.1. Le modèle comportemental

Le modèle comportemental est obtenu à partir de l'ensemble des événements par un traitement qui consiste soit à ignorer des événements qui ne seraient pas pertinents, soit à remplacer certaines séquences d'événements par un descripteur de plus haut niveau déterminé par le langage de commande du système. On obtient ainsi une description des observables dans le langage du système dont on exige qu'elle permette de "rejouer" la session de l'apprenant de façon fidèle au regard de la problématique dans laquelle on se place. On peut être tenté d'affirmer qu'il n'y a pas d'interprétation mais seulement une transduction régulière. Mais comme pour le didacticien, cette transformation, que nous appellerons *homomorphisme de comportement*⁹, exige un découpage et une organisation de l'ensemble des événements. En particulier le traitement d'événements "continus", par exemple issus de la manipulation directe d'icônes à l'interface du système, pose un problème complexe de caractérisation, voire de discrétisation, pour pouvoir être utilisés dans le traitement didactique.

Dans le cas de CABRI-géomètre¹⁰ un modèle comportemental réduit est constitué par un graphe de nœuds (les objets de CABRI) et d'étoiles (les transformations de CABRI) qui rend compte de la structure logique de la solution au sens de la connaissance de référence. La fonctionnalité *Enoncé* du logiciel en donne une description dans un langage proche de la langue naturelle. Les figures ci-dessous donnent une représentation de la solution d'un élève au problème de la construction du symétrique d'un segment donné par rapport à un axe donné (figure 6), son énoncé (c'est-à-dire sa description au sens de CABRI-géomètre, figure 7) et le modèle comportemental associé (figure 8). L'homomorphisme de comportement, défini par la version actuelle de CABRI-géomètre, ne retient que les événements susceptibles d'une signification géométrique. Si dans le cours de la résolution l'apprenant a demandé une aide (par exemple l'explication d'une primitive de construction), cette information n'est pas conservée.

⁹ Ce que nous traduirons en anglais par *behavioral mapping*. Le terme "mapping" est employé pour désigner un processus de représentation de la connaissance qui respecterait des propriétés de structure, il s'agirait en quelque sorte d'une incarnation de la connaissance dans la matière (éventuellement symbolique) que constitue le dispositif informatique. Le terme homomorphisme veut rendre compte de cette idée.

¹⁰ On trouvera, dans ce même volume, une description de ce micromonde de géométrie élémentaire dans le texte de la communication de C. & J.M. Laborde : "Micro-monde intelligents et environnement d'apprentissage". Voir aussi [Baulac 90], [Laborde 90].



Les traits épais sont les éléments donnés du problème
(le segment dont on cherche l'image et l'axe de symétrie)

Figure 6

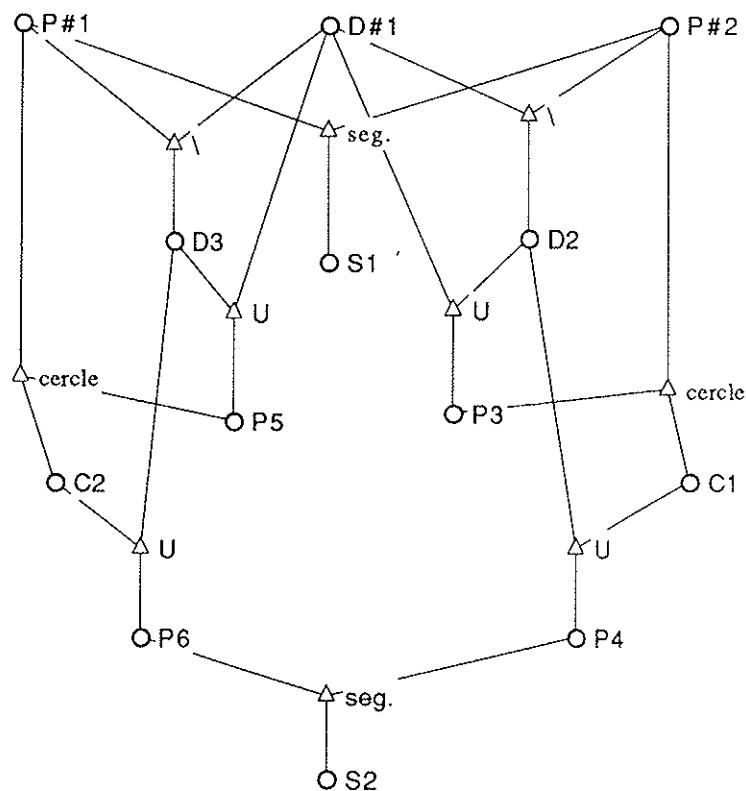
Enoncé de "figure n° 1"	
La figure comporte 13 objets.	
<div style="border: 1px solid black; height: 40px; width: 100%;"></div>	
<p>D#1 : droite quelconque P#1 : point quelconque P#2 : point quelconque segment [P#1 P#2] D#2 : droite passant par P#2 et perpendiculaire à D#1 P#3 : intersection des 2 droites D#1 et D#2 C#1 : cercle de centre P#3 passant par P#2 P#4 : intersection de la droite D#2 et du cercle C#1 (P#2 est D#3 : droite passant par P#1 et perpendiculaire à D#1 P#5 : intersection des 2 droites D#3 et D#1 C#2 : cercle de centre P#5 passant par P#1 P#6 : intersection de la droite D#3 et du cercle C#2 (P#1 est segment [P#6 P#4])</p>	

Description de la configuration construite (figure 6)
donnée par la fonctionnalité "énoncé" de CABRI-géomètre.

Figure 7

4.2.2. Le modèle épistémique

Le modèle épistémique est construit à partir du modèle comportemental. Il correspond en fait à ce que l'on entend en général par "modèle de l'apprenant" dans la littérature. Sa construction requiert un traitement du modèle comportemental qui n'est pas autre chose que le diagnostic, c'est-à-dire la reconstruction, à partir des observables, du processus de résolution de problèmes (ce mot est pris ici dans un sens très large), ou la caractérisation de l'état cognitif de l'apprenant. La fonction de diagnostic dépend de façon étroite des choix théoriques qui sont faits, au moment de sa spécification, sur la nature et le fonctionnement des connaissances de l'apprenant et sur les formes de l'apprentissage.



Ce graphe montre la structure au sens de CABRI-géomètre
de la construction réalisée (figure 6).
Il constitue une représentation du modèle comportemental.

figure 8

Si on ne peut examiner directement la relation entre le modèle épistémique et l'état effectif des connaissances de l'apprenant, en revanche on peut examiner la relation

qu'entretient ce modèle avec le modèle (conception) élaboré par le didacticien, sous la réserve de sa validité. Nous dirons de cette relation qu'elle constitue un *épistémomorphisme*¹¹ si elle permet de mettre en évidence que le modèle épistémique rend compte des propriétés structurelles et conceptuelles décrites par le modèle de conception attribué à l'apprenant.

Le logiciel DEBUGGY [Van Lehn 82] est un bon exemple de construction d'un modèle épistémique dans le domaine de la mise en oeuvre d'un algorithme de soustraction en colonne de nombres entiers naturels. Le modèle comportemental est ici réduit au résultat de la soustraction. L'erreur est identifiée à l'écart entre le résultat de l'apprenant et le résultat correct calculé par le système. Elle est interprétée comme le symptôme d'une *procédure-clé*¹² dont disposerait l'apprenant, dont la mise en défaut par le problème courant conduit à un *bricolage* (repair) producteur du résultat erroné. La théorie cognitive sous-jacente (la "REPAIR theory", [Brown 80]) est que la procédure de l'apprenant peut être modélisée par une version altérée d'une procédure correcte. La fonction de diagnostic consiste en la construction de la procédure-clé à partir d'une procédure de référence connue du système, puis en l'association d'une procédure de *bricolage* sous la réserve d'une procédure, dite *critique*, visant à satisfaire un principe de plausibilité psychologique. La validation du diagnostic consiste en la vérification de sa capacité à générer l'erreur observée. Brown et Van Lehn posent explicitement le problème de la plausibilité psychologique de leur modèle, en revanche ils n'abordent pas celui de l'existence d'un épistémomorphisme entre leur modèle et des conceptions de la soustraction telles que le didacticien pourrait les spécifier.

4.2.3. Les lieux multiples de l'interprétation

Le cadre d'analyse décrit ici diffère par plusieurs aspects de celui proposé par Wenger : d'une part par la signification attribuée au terme comportement et, d'autre part, par le lieu de l'interrogation épistémologique et la problématique qui en découle. En effet, par comportement nous entendons ici une action déclenchée par l'apprenant à l'interface du système et identifiable sous la forme de signaux au sens physique (les événements) alors que Wenger entend par là les actions constitutives du processus de résolution de problèmes. C'est pour cette raison que cet auteur est amené à distinguer les comportements observables des comportements non observables¹³ qu'il peut être nécessaire de reconstruire pour déclencher une interaction pertinente. Nous retrouvons,

¹¹ En anglais, *epistemological mapping*.

¹² Traduction libre de "Core-procedure".

¹³ Opérations mentales de l'apprenant qui ne donnent pas lieu à la production d'événements à l'interface du système ([Wenger 87] p.368).

quant à nous, ce problème au niveau du calcul du modèle épistémique, mais avec une différence de taille : nous ne séparons pas connaissance et procédure¹⁴. La distinction de Wenger, entre comportemental (behavior) et épistémique, conduirait dans notre approche à éventuellement reconnaître des types de modèles épistémiques différents par la nature des entités qui les constituent et leur structure. On pourrait rendre compte de cette distinction en parlant de modélisation procédurale et de modélisation conceptuelle. Quoiqu'il en soit, la construction de ces modèles nécessite une interprétation des comportements observés qui ne serait pas moindre parce qu'elle se limiterait à des descriptions procédurales. En particulier, s'il s'agit d'inférer des procédures non directement observables, on ne voit pas comment une telle inférence pourrait avoir lieu sans hypothèses fortes sur les connaissances de l'apprenant.

Par exemple, dans le contexte de CABRI-géomètre, une solution proposée par un élève au problème précédent pourrait consister en la mise en oeuvre d'une procédure particulière qui ne correspondrait à aucun observable que les fonctionnalités du système, au sens de la géométrie, permettraient de décrire (par exemple le placement de point "au jugé"). La mise en évidence d'observables pertinents n'est ici possible que par une analyse de l'ensemble des événements avec le filtre d'une modélisation de la résolution de cette classe de problèmes dont dispose actuellement le didacticien.

Notre approche permet de distinguer des lieux et des formes de questionnement épistémologique :

- (i) questions liées à la spécification de l'homomorphisme de comportement. Le problème est celui de la capacité à simuler l'apprenant au sens de la reproduction de la suite des observables pertinents au regard de la problématique dans laquelle on se place. "Pertinence" signifie ici que l'histoire ainsi reconstruite contient les matériaux suffisants pour calculer le modèle épistémique, c'est-à-dire pour caractériser la relation entre l'apprenant et la connaissance en jeu. C'est en cela que ce questionnement relève de l'épistémologie.

- (ii) questions liées à la fonction de diagnostic et au modèle épistémique qui en résulte. Le problème est celui de la description de la relation entre l'apprenant et la connaissance concernée en des termes pertinents et utilisables pour le calcul de l'interaction didactique. Ce questionnement est d'essence essentiellement épistémologique.

¹⁴ Notons ici que Wenger dans une note de bas de page exprime un doute qu'il n'examine pas plus avant sur la possibilité d'une telle séparation : "the difference between unobservable behavior and knowledge can be subtle and may only make sense in the context of a communication environment" (ibid. p.368)

- (iii) questions portant sur la propriété d'épistémomorphisme de la relation entre le modèle épistémique et la conception attribuée à l'apprenant.

Le problème de l'identification et du traitement de l'erreur peut recevoir ici une nouvelle formulation. Remarquons, d'abord, que l'erreur n'est pas un fait mais la lecture d'un fait qui comme tout autre observable doit pouvoir être identifié dans le réel offert à l'observation. L'erreur n'existe pas en tant que telle au niveau du modèle comportemental, en revanche, doivent pouvoir figurer à ce niveau les éléments, comportements ou absences identifiables de comportements, qui serviront d'arguments au diagnostic d'erreur et à son interprétation. L'interface du système constitue donc de fait un filtre dont les caractéristiques vont largement déterminer les possibilités de constitution d'un modèle comportemental pertinent.

L'examen du problème de l'erreur au niveau du modèle comportemental fait apparaître une notion plus générale, celle d'*écart au comportement attendu*. Ainsi, en mode apprentissage par l'action, APLUSIX identifie et traite des écarts à une solution contrôlée par le système [Nicaud 89b]¹⁵. Nous réservons le terme d'*erreur* à l'*interprétation* d'un ou plusieurs observables pour la construction du modèle épistémique. Pour reprendre une distinction évoquée plus haut, cette interprétation peut être essentiellement procédurale, comme dans le cas de la reconstruction de règles erronées dans PIXIE [Sleeman 83], ou conceptuelle dans le cas de la tentative d'ELECTRE [Paliès 88] de construction d'un modèle conceptuel des connaissances de l'apprenant.

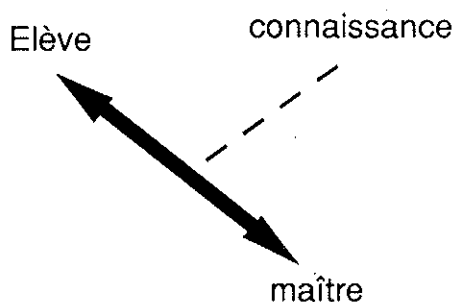
Le rôle essentiel de l'interface dans l'interaction homme/machine est maintenant bien repéré. Pour ce qui concerne les environnements informatiques d'apprentissage, une première direction de recherche consiste à concevoir les interfaces contraignantes permettant de traiter des écarts avec une certaine finesse, c'est l'option des "tuteurs" tel PROOF-Tutor, une autre direction consiste à spécifier une interface perméable à des événements susceptibles d'être traduits dans le modèle comportemental selon des éléments auxquels pourra être fait le procès d'erreur, c'est l'option des environnements de type "découverte guidée". Cette dernière direction de recherche apparaît plus complexe parce qu'elle exige une analyse plus profonde du domaine et des conceptions possibles d'un apprenant [Miller 88].

¹⁵ C'est aussi le cas des tutoriels développés dans le cadre théorique ACT* (Adaptive Control of Thought [Anderson 83]) dont un principe d'interaction est de sanctionner tout écart de l'apprenant aux résolutions admises par le système, quelle que soit par ailleurs leur validité.

5. MODELISATION DE L'INTERACTION DIDACTIQUE

5.1. INTERACTIONS DIDACTIQUES

L'interaction didactique a pour finalité de permettre que l'apprenant s'approprie une connaissance déterminée. Elle est organisée par le maître. Le schéma classique, au sens où il est historiquement le premier mis en œuvre dans l'école, est celui de la communication entre le maître et ses élèves (figure 9). La connaissance est l'enjeu de cette communication, mais la nature sociale de cette interaction peut conduire à des dysfonctionnements affectant la signification de la connaissance construite. L'élève cherchant à satisfaire le maître est susceptible de construire une connaissance qui ne sera pas opératoire dans les situations auxquelles elle est destinée. Pour reprendre la métaphore économique de Lave, la dimension sociale de l'interaction avec le maître et sa dissymétrie peut conduire à privilégier la valeur d'échange de la connaissance au détriment de sa valeur d'usage [Lave 89].

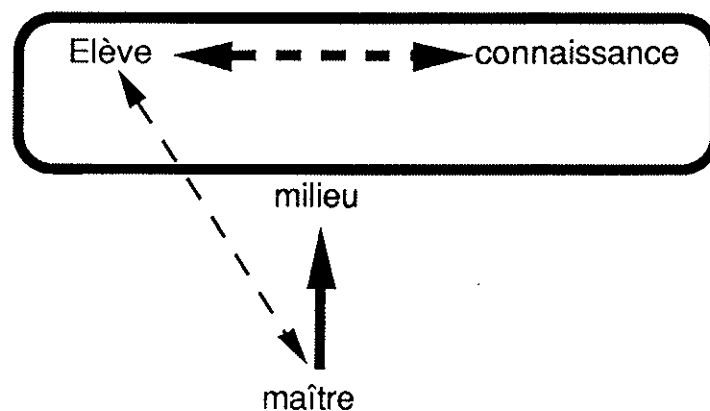


La connaissance est l'objet de la communication entre le maître et l'élève

Figure 9

Pour dépasser la difficulté créée par l'interaction directe du maître et de l'élève, les recherches actuelles s'orientent vers la caractérisation et l'étude de dispositifs d'enseignement qui permettraient l'émergence de la connaissance comme produit de l'interaction de l'élève avec un milieu qui lui serait spécifique. C'est dans cette direction que se sont développées les recherches en didactique des mathématiques, forgeant en

particulier les concepts de situation a-didactique et de situation fondamentale (cf. supra). Le schéma ci-dessous illustre ce type de situation (figure 10).



C'est de l'interaction entre l'élève et le milieu,
organisé par le maître, que doit émerger
la connaissance.

Figure 10

Cependant ce type de situation ne garantit pas l'apprentissage visé, elle permet seulement, s'il a lieu, de faire l'hypothèse que la connaissance construite est pourvue d'une signification correcte. En effet, l'élève peut s'en tenir à des démarches très empiriques s'il éprouve que cela suffit pour réduire significativement son incertitude sur la solution qu'il propose, ou encore il peut une connaissance au lieu d'une autre parce qu'elle est l'objet d'une leçon plus récente et non parce qu'elle est suggérée par une analyse de la situation elle-même. Par exemple, en mathématiques, si le rapporteur est un instrument explicitement autorisé pour la résolution d'un problème de géométrie, alors l'élève pourra penser qu'il lui faut chercher une solution utilisant les angles ; mais son absence peut tout aussi bien prendre une signification : "les angles ça va pas marcher parce que t'avais pas prévu de rapporteur" ([Balacheff 88], p.358). Comme tout autre individu, l'élève ne mobilise pas plus de logique que ce qui lui semble nécessaire pour les besoins de sa pratique [Bourdieu 80], mais il peut en résulter que la connaissance élaborée dans ce cadre soit très différente de celle visée. De tels phénomènes sont inhérents d'une part à la nature du processus d'adaptation, d'autre part au caractère didactique des situations d'apprentissage, c'est-à-dire des situations organisées délibérément pour permettre un apprentissage précis. Le concept de *contrat didactique* [Brousseau 86] a été forgé pour permettre l'étude de ces liens entre l'enseignant et l'élève qui déterminent, de façon le plus souvent implicite, les responsabilités et le rôle de

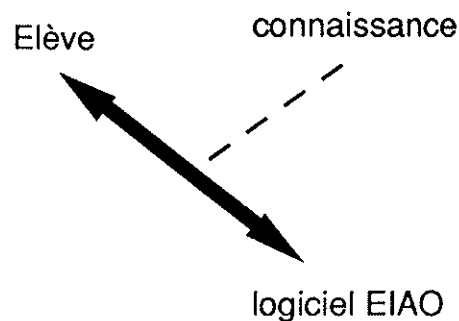
chacun relativement à la connaissance, et qui sont susceptibles d'affecter le produit de l'apprentissage. Ainsi, l'élève est toujours susceptible de percevoir le projet didactique, c'est à dire celui du professeur, au-delà de la situation dans laquelle il se trouve engagé et intégrer ses conceptions de ce projet dans les décisions qu'il prendra dans la situation d'apprentissage. Dans le schéma ci-dessus (figure 10), la flèche double entre l'élève et le maître rappelle la permanence de leur relation dès lors que l'on se trouve dans un processus didactique.

Si tout acte de l'enseignant est susceptible de prendre une signification relativement à l'activité de l'élève et de devenir le générateur de "perturbations" de l'apprentissage, on peut se poser la question de savoir si sa présence est indispensable. Si l'on ne pourrait l'écarter pour éviter ces effets perturbateurs. C'est en partie dans cet état d'esprit que certains pensent l'utilisation d'environnements d'apprentissage informatiques, un argument souvent rapporté est que dans cette situation la "faute" n'est plus culpabilisante, que l'élève est plus autonome et en relation plus étroite (i.e. directe) avec le contenu de connaissance à acquérir¹⁶. La substitution de logiciels EIAO au maître conduirait aux schémas ci-dessous (figures 11 et 12). Mais cette substitution ne suffit pas à obtenir les effets espérés. Ainsi, par exemple, on sait bien que le dialogue socratique peut privilégier des comportements de l'apprenant qui relèvent plus de la découverte des intentions du tuteur, la réponse est devinée, que d'une construction spécifique des conceptions dont il dispose. Ces situations d'auto-apprentissage (apprentissage sans enseignant humain) ont quoiqu'il en soit une finalité didactique explicite que l'apprenant peut concevoir et intégrer dans son analyse de la situation. Il ne s'agit pas de la substitution d'une valeur d'échange à une valeur d'usage, mais de la modification de la valeur d'usage par son adaptation à une situation qui ne se réduit pas aux seuls aspects spécifiques de la connaissance en jeu.

Par ailleurs, l'apprenant ne peut interagir avec le dispositif informatique sans engager un système de représentation et de traitement comme cela est le cas pour l'utilisation de tout autre logiciel [Hoc %]. La communication apprenant-machine passe par l'appropriation et la maîtrise par l'apprenant d'un mode de communication symbolique spécifique qui peut affecter l'apprentissage. On peut à cet endroit se poser la question du rôle que peut jouer la représentation que l'apprenant a du fonctionnement du dispositif informatique dans sa construction d'une connaissance. Des travaux portant sur l'apprentissage de la programmation ont mis en évidence le rôle essentiel joué par ces

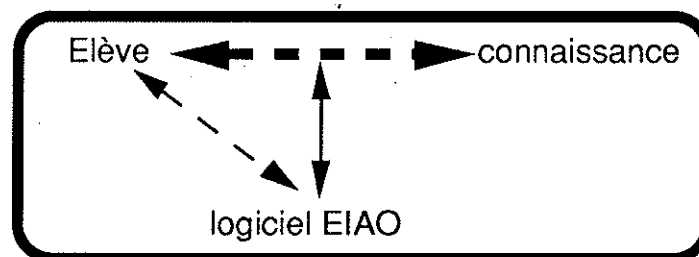
¹⁶ Dans une critique socio-politique vigoureuse, Schostak caractérise ainsi l'une des thématiques de l'introduction de l'ordinateur à l'école : "With advances in information technology, rendering them cheaper, faster, more powerful, and intelligent the ITS-pupil interface will need no third party in the form of the teacher" [Schostak 90].

représentations dans l'acquisition des connaissances par les élèves (cf. par exemple [Pea 84], [Rogalski 88]).



Interaction de l'élève et du logiciel dans
une perspective de communication
de la connaissance.

Figure 11



Interaction de l'élève et du logiciel
dans une perspective de type
découverte guidée.

Figure 12

La nature de l'interaction didactique créée et ses implications ne peuvent, à notre sens, être décrite et étudiée dans les seuls termes des classifications en usage : le dialogue socratique, la rétroaction immédiate, la découverte guidée, etc. Cette interaction doit pouvoir être caractérisée en répondant à la question de savoir quelle est la place de la connaissance et sa fonction dans les décisions de l'élève, dans sa gestion de l'interaction. La question ne s'est pas simplifiée avec la "disparition du maître", au contraire puisqu'il faut ajouter à sa complexité celle inhérente à l'utilisation d'un dispositif technique de traitement de l'information.

5.2. L'EIAO DANS LA CLASSE

Mais, peut-on se passer du maître ? Notre réponse est non, au moins pour ce qui concerne l'enseignement général, ou plus précisément l'enseignement qui touche la tranche d'âge de 3 à 18 ans. Les bornes de cet intervalle sont bien sûr arbitraires, disons qu'elles recouvrent ce qui constitue, dans la plus part des pays, l'enseignement obligatoire et l'enseignement secondaire.

Le maître est nécessaire pour de nombreuses raisons parmi lesquelles :

- (i) il organise les apprentissages d'individus fortement dépendants du monde adulte (dans l'enseignement élémentaire en particulier),
- (ii) il assure la socialisation des connaissances et leur compatibilité avec les connaissances du "monde extérieur"¹⁷,
- (iii) il permet, parmi toutes les productions résultant de l'activité de la classe, d'identifier celles qui perdureront avec le véritable statut d'un savoir : il les institutionnalise.

Cette dernière raison est souvent oubliée, elle est pourtant essentielle pour que "l'enseignement" ait lieu. En effet, parmi toutes les constructions intellectuelles qu'il a élaborées au cours de son activité, l'élève ne peut distinguer seul celles qui doivent être retenues et conservées pour un réinvestissement futur. Celles qui n'ont pas seulement un caractère local, adapté à la situation courante, mais qui participent d'un savoir nouveau. "Le sujet banalise la question dont il connaît les réponses dans la mesure où il n'a pas les moyens de savoir si d'autres se la sont posée avant lui, ou si personne n'a su y répondre, ou encore si d'autres questions lui ressemblent ou lui sont liées par le fait qu'elles pourront recevoir une réponse grâce à celle-ci, etc. Il faut donc que quelqu'un d'extérieur vienne pointer ses activités et identifie celles qui ont un intérêt, un statut culturel" ([Brousseau 86], p.71).

L'introduction de l'EIAO dans la classe soulève des problèmes complexes, d'un point de vue matériel, mais aussi d'un point de vue pédagogique et didactique. Vivet, envisageant divers scénarios, suggère bien la complexité de la gestion pédagogique d'une situation d'enseignement dans laquelle un maître collaborerait avec des environnements d'apprentissage informatiques ou leur délèguerait une partie de sa responsabilité [Vivet 90]. Comment le tuteur peut décider de repasser la main au maître pour résoudre un

¹⁷ La complexité de cette tâche et l'échec souvent attesté (cf. par exemple [Resnick 87]) ne change rien au fait que cette responsabilité incombe au maître. Il est de la responsabilité des recherches en éducation et en didactique de comprendre les origines de cet échec et de trouver les moyens de sa disparition.

problème qui échappe à sa "compétence" ? Comment le tuteur pourrait-il mettre en rapport des élèves dont il lui paraîtrait intéressant qu'ils confrontent leurs points de vue ou qu'ils s'aident mutuellement ? etc.

Du point de vue didactique, le contexte de fonctionnement de la connaissance est sensiblement modifié, voir complexifié. Nous allons, pour le montrer, reprendre les schémas d'interaction précédents. Dans le premier schéma (figure 13), le maître organise la "rencontre" entre un tuteur et un élève. Il décide du moment de cette rencontre, il explicite ou non sa finalité dans le contexte de la relation d'enseignement plus globale qu'il a avec l'élève. L'enjeu de l'interaction avec le logiciel est l'acquisition par l'élève d'une certaine connaissance. Dans cette situation, l'élève peut percevoir à la fois les intentions didactiques du maître et, au moment de l'interaction, celles du tuteur.

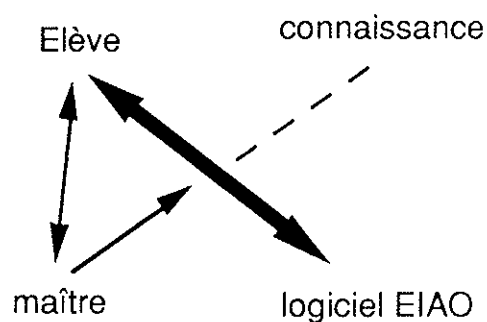


Figure 13

Dans le second schéma (figure 14), le maître organise un milieu dans lequel le logiciel est utilisé comme un moyen, une partie du milieu lui-même. L'élève devrait, dans le cours de son activité au sein de ce milieu, élaborer les structures intellectuelles constitutives de la connaissance que l'on veut lui enseigner. L'ambition serait que l'activité de l'élève ne doive rien à son analyse des attentes éventuelles du maître, mais le seul fait de la présence de l'ordinateur ne suffit pas à le garantir. C'est la négociation du statut de cette situation dans le processus d'enseignement, autrement dit la négociation du contrat didactique, qui sera le moyen de s'approcher d'une véritable situation didactique. En revanche l'élève peut rechercher dans ses interactions avec le dispositif informatique les indices des intentions du maître, et par là le moyen de satisfaire à sa tâche sans nécessairement agir dans le registre des connaissances visées.

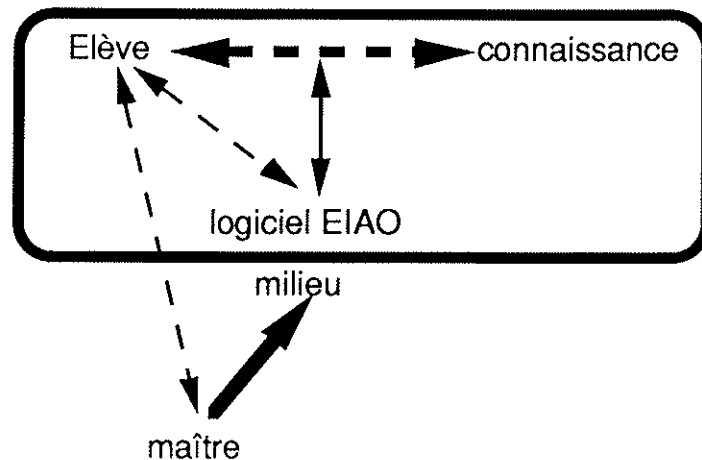


Figure 14

6. DES QUESTIONS OUVERTES

De nombreuses questions, fondamentales ou techniques, occupent actuellement la communauté des chercheurs dans le domaine de la conception et du développement d'environnements d'apprentissage informatiques. Certaines d'entre elles apparaissent maintenant classiques, telles la modélisation de l'apprenant, la modélisation des connaissances de référence, la production d'explications, le choix des moments et des modes d'interaction avec l'apprenant, etc. D'autres questions semblent avoir échappé à la problématique de l'EIAO, vraisemblablement parce que le domaine est jeune et est loin d'avoir été confronté à toute la complexité et toute la richesse des phénomènes qui le concernent. Nous pensons que l'approche du didacticien permet de révéler certaines d'entre elles, c'est sur cette tentative que nous voulons conclure.

L'introduction d'environnements informatiques, de type EIAO (tuteur, découverte guidée, micromonde intelligent, etc.) complexifie la situation d'enseignement d'un point de vue didactique parce qu'un dispositif informatique est d'abord, et essentiellement, un opérateur de traitement d'informations symboliques. Cette particularité intervient de deux façons :

- d'une part, par la modification des connaissances à enseigner dans le processus de transposition informatique,

- d'autre part, parce que l'élève comme le maître peut voir dans la machine un nouvel interlocuteur, un nouveau partenaire dans la négociation et la mise en œuvre de l'interaction didactique.

Dans ce contexte la "négociation" d'une situation d'apprentissage avec les élèves demande que soit prise en charge non seulement la tâche et sa signification, mais aussi la part de transfert de la responsabilité didactique du maître vers la machine. En effet, c'est de la qualité de cette négociation que dépend le caractère a-didactique de l'interaction entre l'élève et la machine qui permettra l'émergence de la connaissance. L'étude des caractéristiques de ces situations et de leur fonctionnement est, aujourd'hui, à peine commencée.

L'enseignant ne pourra pleinement insérer un environnement informatique dans sa pratique professionnelle, que s'il peut avoir sur cet outil toute l'information qui permettrait de situer sa place et son impact dans un processus didactique. D'une certaine façon, il devrait pouvoir connaître le dispositif informatique d'un point de vue didactique, comme il pourrait connaître un collègue avec qui il partagerait la responsabilité d'un enseignement en alternance dans une classe.

Cela pose évidemment le problème d'une spécification et d'une documentation explicite de la connaissance "embarquée" dans la machine et des formes de son engagement dans une interaction didactique, en référence à un apprentissage espéré.

Mais cela pose aussi le problème de la communication entre le maître et la machine à propos des apprentissages. On s'est beaucoup penché sur le problème de la production d'explications par un tuteur à des fins d'enseignement ([Clancey 83], [Vivet 87]). Cette explication est orientée vers l'apprenant pour lui faciliter l'acquisition d'un savoir ou d'un savoir faire. En revanche, le problème de l'explication du tuteur en direction du maître, dont l'objet serait la nature des apprentissages et des interactions didactiques avec l'apprenant, n'a pas été envisagé. Pourtant, la capacité de la machine à trouver une place dans le système didactique, comme collaborateur du maître, dépend de sa capacité à communiquer dans le registre didactique. La restitution de la trace des actions de l'élève sera insuffisante pour satisfaire la demande d'informations du maître, de même que la trace de la résolution d'un problème ne constitue pas l'explication la plus pertinente de sa solution ([Vivet 87], [Balacheff 90]). Pour aller au-delà il nous faudra savoir caractériser *un problème didactique* et sa résolution par un système informatique, cette question constitue aujourd'hui un problème ouvert pour le didacticien comme pour le chercheur informaticien en EIAO.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Anderson 83] Anderson, J.R. (1983) *The architecture of cognition*. Cambridge, MA : Harvard University.
- [Anderson 88] Anderson, J. R. (1988) The Expert Module. In Polson, M. C.; & Richardson, J. J. (Eds.) *Foundations of Intelligent Tutoring Systems*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates. pp.21-53.
- [Arnaud 84] Arnaud, P. (1984) *Schémas et représentations en chimie dans leurs rapports à la didactique*. In : Giordan A., & Martinand J.L. (Eds.) Actes des sixièmes journées internationales sur l'éducation scientifique. Chamonix : Centre Jean Franco. pp.107-116.
- [Arsac 87] Arsac, G. (1987) *L'origine de la démonstration*. Recherches en didactique des mathématiques. 8 (3) pp.267-312.
- [Balacheff 88] Balacheff, N. (1988) *Une étude des processus de preuve en mathématiques chez des élèves de collège*. Thèse de doctorat ès sciences. Grenoble : Université Joseph Fourier.
- [Baulac 90] Baulac, Y. (1990) *Un micro-monde de géométrie, CABRI-géomètre*. Thèse. Grenoble : Université Joseph Fourier.
- [Bourdieu 80] Bourdieu, P. (1980) *Le sens pratique*. Paris : Editions de Minuit
- [Brousseau 83] Brousseau, G. (1983) Les obstacles épistémologiques et les problèmes en mathématiques. *Recherches en didactique des mathématiques*. 4 (2) pp.164-198.
- [Brousseau 86] Brousseau, G. (1986) Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques. *Recherches en didactique des mathématiques*. 7 (2) pp.33-115.
- [Brown 80] Brown, J. S., & Van Lehn K. (1980) *Repair Theory: a generative theory of bugs in procedural skills*. Cognitive Science. 4 pp.379-426.
- [Brown 89] Brown, J.S. (1989) Situated learning – Toward a new epistemology of learning. Palo Alto : Institute for research on learning.
- [Burton 88] Burton, R. R. (1988) The Environment Module of Intelligent Tutorial Systems. In Polson, M. C.; & Richardson, J. J. (Eds.) *Foundations of Intelligent Tutoring Systems*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates. pp.108-142.
- [Chevallard 85] Chevallard, Y. (1985) *La transposition didactique*. Grenoble : La Pensée Sauvage.
- [Clancey 83] Clancey, W.J. (1983) *The epistemology of a rule based expert system : A framework for explanation*. Artificial Intelligence. Vol.20 pp.215-251.
- [Clancey 90] Clancey, W.J. (1990) How should expert system technology be applied for education. *NATO workshop "New directions for I.T.S."* NATO-ASI Series. Springer Verlag (à paraître)
- [Gex 47] Gex, M. (1947) *Eléments de philosophie des sciences* (titre original : Méthodologie). Neuchâtel : Le Griffon 1(964)
- [Glaeser 81] Glaeser, G. (1981) *Epistémologie des relatifs*. Recherches en didactique des mathématiques. 2 (3) pp.303-346.
- [Grenier 88] Grenier, D. (1988) *Construction et étude du fonctionnement d'un processus d'enseignement sur la symétrie orthogonale en sixième*. Thèse. Grenoble : Université Joseph Fourier.
- [Hoc %]
- [Inhelder 85] Inhelder, B., & Caprona, D (1985) *Constructivisme et création de nouveautés*. Archives de psychologie. 53 (204) pp.7-18.
- [Johsua 87] Johsua, S.; & Dupin, J.J. (1987) *La gestion des contradictions dans des processus de modélisations physiques en situation de classe*. Actes du colloque

- "Didactique et acquisition des connaissances scientifiques". Grenoble : La Pensée Sauvage (1988) pp. 185-199.
- [Kodratoff 86] Kodratoff, Y. (1986) *Is AI a sub-field of computer science ? or, AI is the science of explanations*. Rapport de recherche n°312. Laboratoire LRI. Orsay : Université de Paris XI.
- [Kuhn 70] Kuhn, T.S. (1970) *Les structures des révolutions scientifiques*. Paris : Flammarion (1983).
- [Laborde 86] Laborde, J.M. (1986) *Proposition d'un CABRI-géomètre, incluant la notion de figures déformables*. Sujet d'année spéciale. Grenoble : ENSIMAG.
- [Laborde 89] Laborde, J.M.; & Trilling, L. (1989) *Conception et réalisation d'un système intelligent d'apprentissage de la géométrie*. Présentation de projet IMAG. Grenoble : Institut IMAG-CNRS.
- [Laborde 90] Laborde, J.M.; Strässer, R. (1990) Cabri-géomètre : a microworld of geometry for guided discovery learning. *Zentralblatt für Didaktik des Mathematik* 5 pp.171-177.
- [Lave 89] Lave, J.; & Wenger, E. (1989) *Situated learning : Legitimate Peripheral Participation*. Research Report N°IRL 89-0013. Palo Alto : Institute for Research on Learning.
- [Littman 88] Littman, D.; & Soloway, E. (1988) Evaluating ITSs : The Cognitive Science Perspective. In Polson, M. C.; & Richardson, J. J. (Eds.) *Foundations of Intelligent Tutoring Systems*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates. pp.209-242.
- [McCarthy 77] McCarthy, J. (1977) Epistemological Problems of Artificial Intelligence. *Proceedings IJCAI-77*. Cambridge, MA. pp.1038-44.
- [Miller 88] Miller, J. R. (1988) The Role of Human-Computer Interaction in Intelligent Tutoring Systems. In Polson, M. C.; & Richardson, J. J. (Eds.) *Foundations of Intelligent Tutoring Systems*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates. pp.143-189.
- [Nicaud 87] Nicaud, J.F. (1987) *APLUSIX : un système expert en résolution pédagogique d'exercices d'algèbre*. Thèse. Orsay : Université de Paris XI.
- [Nicaud 89a] Nicaud, J.F. (1989) *APLUSIX : un système expert pédagogique et un environnement d'apprentissage dans le domaine du raisonnement algébrique*. *Technique et Science Informatique* 8(2) pp.145-155.
- [Nicaud 89b] Nicaud, J.F.; Aubertin, C.; Nguyen Xuan, A.; Saïdi, M.; & Wach, P. (1989) *APLUSIX : un environnement d'apprentissage à plusieurs niveaux dans le domaine du raisonnement algébrique*. Actes des premières Journées EIAO de Cachan. Cachan : Ecole Normale Supérieure.
- [Palies 88] Palies, O. (1988) *Méta-connaissance pour la modélisation de l'élève. Contribution au diagnostic cognitif par système expert*. Thèse. Paris : Université de Paris VI.
- [Pea 84] Pea, R.D. (1984) *Language-independent conceptual "bugs" in novice programming*. *Journal of Educational Computing*. Special issue on "Novice Programming". pp.1-12.
- [Resnick 87] Resnick, L.B. (1987) Learning in school and out. *Educational Researcher*. 4 pp.13-20.
- [Resnick 90] Resnick, L.B.; Lesgold S.; & Bill, V. (1990) From protoquantities to number sense. *Actes de la XIV^e conférence du groupe "Psychologie of Mathematics Education"*. Mexico. pp.305-312.
- [Rogalski 84] Rogalski, J. (1984) *Représentations graphiques dans l'enseignement : concepts et méthodes d'analyses appliquées aux graphes de fonctions*. In : Giordan A., & Martinand J.L. (Eds.) *Actes des sixièmes journées internationales sur l'éducation scientifique*. Chamonix : Centre Jean Franco. pp.379-388.
- [Rogalski 88] Rogalski, J. (1988) *Les représentations mentales du dispositif informatique dans l'alphabétisation*. Actes du "Premier colloque Franco-allemand

- de didactique des mathématiques et de l'informatique" (C. Laborde, Ed.). Grenoble : La Pensée Sauvage. pp.235-245.
- [Schostak 90] Schostak, J.F. (1990) The teacher - ITS, the vanishing point ? *Troisième conférence Européenne sur les tuteurs intelligents*. Dannemark : Aarhus.
- [Self 89] Self, J. (1989) *The case for formalising students models (and intelligent tutoring systems generally)*. Proceedings of the 4th International Conference on AI and Education. Amsterdam, May 1989.
- [Sleeman 83] Sleeman, D.H. (1983) *Inferring students models for intelligent computer-aided instruction*. In : Michalski R.S., Carbonell J.G., & Mitchell T.M. (Eds.) *Machine Learning : an artificial intelligence approach*. Palo Alto : Morgan Kaufmann.
- [Van Lehn 82] Van Lehn, K. (1982) *Bugs are not enough: empirical studies of bugs, impasses and repairs in procedural skills*. Journal of Mathematical Behaviors. Vol. 3 pp. 3-72.
- [Vergnaud 81] Vergnaud, G. (1981) *Quelques orientations théoriques et méthodologiques des recherches françaises en didactique des mathématiques*. Actes de la V^o conférence du groupe "Psychology of Mathematics Education". Vol. II, pp.7-17.
- [Vergnaud 84] Vergnaud, G. (1984) *Interaction sujet-situations*. Actes de la III^e Ecole d'Eté de Didactique des Mathématiques. Grenoble : IMAG. pp.22-42.
- [Vivet 87] Vivet, M. (1987) *Système expert pour enseigner : méta-connaissance et explication*. Congrès international MARI/COGNITIVA. Paris.
- [Vivet 90] Vivet, M. (1990) Uses of ITS, which role for the teacher ? *NATO workshop "New directions for I.T.S."* NATO-ASI Series. Springer Verlag (à paraître)
- [Wenger 87] Wenger, E. (1987) *Artificial Intelligence and Tutoring Systems*. Los Altos : Morgan Kaufmann Pub. Inc.